新型终端滑模在光电稳定平台中的应用

任 彦,牛志强

(内蒙古科技大学 信息工程学院,内蒙古 包头 014010)

摘 要: 为了提高光电伺服稳定平台的跟踪精度,针对系统中干扰的影响提出一种新型终端滑模控制算法。首先,提出一种新型终端滑模干扰观测器的设计方法,实现对系统中干扰的快速估计和实时补偿。其次,设计新型终端滑模控制器来提高系统的跟踪精度,结合有限时间收敛和自适应控制的思想,对切换增益进行在线调整,有效地抑制了滑模控制中的抖振问题,使系统状态能够在有限时间内快速地收敛到所设计的滑模面上,并对未估计干扰进行精细化补偿。最后利用 Lyapunov 理论证明控制系统的稳定性。实验结果表明:该控制策略保证了光电跟踪系统视轴对运动目标的跟踪精度,在 0.05 Hz 时误差小于 0.002°,在 2 Hz 时误差小于 0.034°,增强了系统的鲁棒性。

关键词: 光电稳定平台; 终端滑模; 干扰补偿; 自适应控制; 有限时间

中图分类号: TP273 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.0617005

Application of new terminal sliding mode in photoelectric stabilized platform

Ren Yan, Niu Zhiqiang

(College of Information Engineering, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, China)

Abstract: In order to improve the tracking precision of the photoelectric servo stabilized platform, a new terminal sliding mode control algorithm was proposed to solve the influence of the disturbance. Firstly, a new terminal sliding mode disturbance observer was constructed to realize fast estimation and real-time compensation for interference in the system. Secondly, combining the idea of finite time convergence with adaptive control theory, a new terminal sliding mode controller was designed to improve the tracking accuracy of the system, adjust the switching gain online, and reduce the chattering of the sliding mode controller effectively, so that the system state was quickly converged to the designed sliding surface in the limited time, and take fine compensation for non-estimated interference. Finally, the stability of the closed-loop control system was proved by Lyapunov theory. The experimental results indicated that this control strategy can ensure the tracking accuracy of photoelectric tracking system for moving targets. The error of tracking is less than 0.002° at the 0.05 Hz and less than 0.034° at 2 Hz, and the robustness of the system is enhanced.

Key words: photoelectric stabilized platform; terminal sliding mode; disturbance compensation; adaptive control; finite time

收稿日期: 2018-01-05; **修订日期:** 2018-02-15

基金项目: 国家自然科学基金(61563041);内蒙古自治区自然科学基金(2015MS0603)

作者简介: 任彦(1977-),女,教授,博士,主要从事先进伺服系统控制策略方面的研究。Email:renyan.ry@163.com

通讯作者: 牛志强(1991-),男,硕士生,主要从事先进伺服系统控制策略的研究与应用方面的研究。Email:nzq369060964@163.com

0 引 言

光电稳定平台由于具有隔离载体扰动的特点被广泛的应用于航空航天、目标跟踪以及空间通信等领域,且由早期的单轴发展为三轴以及多轴[1-3]。

光电平台视轴的稳定决定了光电探测设备的成像质量以及能否远距离和高精度的跟踪目标。但是会受到以下干扰的影响[4-6]:一是机构自身的不确定性、摩擦等非线性干扰以及框架间的耦合;二是载体姿态的变化、振动和飞行中的风阻力矩等,使得控制性能难以提高。目前光电稳定平台主要采用 PID 以及平方滞后超前等方法消除扰动[7],这些方法简单易实现,通过提高低频段增益来抑制干扰,但是受限于机械谐振频率,使得控制性能难以提高。

光电稳定平台实质上就是一个“视轴稳定跟踪伺服系统”,主要解决光电跟踪系统视轴稳定与目标跟踪两个问题,从伺服控制角度考虑,就是实现干扰补偿与跟踪控制。针对干扰补偿,干扰观测器(Disturbance Observer,DOB) 通过主动估计系统干扰并进行补偿,但该方法过度依赖精确的数学模型[8-9]。扩张状态观测器(Extended State Observer,ESO)具有鲁棒性强,简单易于实现等优点被广泛地应用于各个领域[10],但是存在干扰估计不足,收敛速度缓慢的问题。参考文献[11]提出一种非奇异终端滑模干扰观测器,对系统的外部干扰项进行估计,该方法无法有效地解决快变干扰的估计问题。针对跟踪控制问题,滑模控制被广泛的应用到伺服系统中。参考文献[12-13]提出的终端滑模控制率中存在奇异项,滑动模态在接近平衡点的过程中会出现抖振现象。参考文献[14]针对传统终端滑模控制存在趋近阶段收敛缓慢的问题,提出了快速终端滑模控制的方法,使得系统状态在远离平衡位置时能以较快的速度收敛至平衡点上,控制律中无切换项,有效的抑制了抖振,然而该方法参数选取不当会导致奇异问题。

为了实现光电跟踪系统视轴稳定跟踪目标,文中提出一种新型的终端滑模干扰观测器(Terminal Sliding Mode Disturbance Observer,TSMDOB)的设计方法,对干扰进行快速的估计与补偿,以减弱扰动力矩的影响,从而保证视轴稳定;另外结合有限时间收敛的思想设计新型终端滑模控制器(Terminal Sliding Mode Control,TSMC),滑动模态在有限时间内以较快的速度收敛至平衡位置上,避免了传统终端滑模控制中的奇异问题,有效地实现了视轴对目标的跟踪。

1 系统模型

光电稳定平台主要是由直流力矩电机、编码器、PWM 功率放大器、位置测角装置、平台框架以及安装在框架上的光学系统等设备组成。一般情况下,电机电感、电枢以及电机负载的粘性阻尼都极小,可以近似的等效为零,所以被控对象的传递函数描述为如下的形式:

$$J_n\ddot{\theta}=-B_n\dot{\theta}+u+D \tag{1}$$

式中:θ 为系统的角位置;$\dot{\theta}$表示系统的角速度;$\ddot{\theta}$为系统的角加速度;J_n 为名义模型转动惯量;B_n 为名义模型粘性阻尼系数;u 为系统的控制量;D 为系统的总干扰,包括载体姿态变化给平台带来的扰动,摩擦力矩、建模误差以及系统的高频未建模动态等。系统参数变化满足:$J_{\min}\leqslant J_n\leqslant J_{\max}$,$B_{\min}\leqslant B_n\leqslant B_{\max}$,$J_{\min}$、$J_{\max}$、$B_{\min}$、$B_{\max}$ 均为正常数。

对于公式(1),选择角位置信号 θ 和角速度信号 $\dot{\theta}$为系统状态变量,令 $x_1=\theta$,$x_2=\dot{\theta}$则系统表示为:

$$\dot{x}_2=ax_2+bu+d \tag{2}$$

式中:$a=-B_n/J_n$;$b=1/J_n$;$d=D/J_n$。

光电稳定平台是一个典型的伺服系统,控制结构如图 1 所示,其中 $r(t)$为系统的输入,$y(t)$系统的输出,$u(t)$为控制器的输入,$u_f(t)$为闭环控制器的输出,$\hat{d}$为干扰观测器估计出的等效干扰。系统内环干扰估计方法采用 TSMDOB,闭环控制器采用 TSMC。

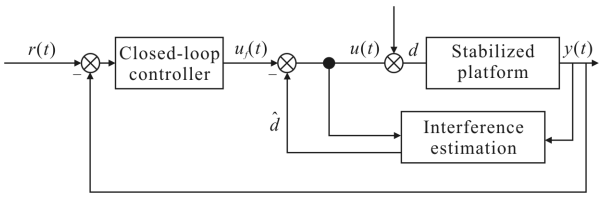

图 1 稳定平台控制系统框图

Fig.1 Block diagram of stabilized platform control system

2 新型终端滑模控制

稳定平台系统中存在摩擦力矩、建模误差等不

确定干扰，为减弱上述不确定干扰对系统的影响，以系统公式(2)为模型设计如下的 TSMDOB，该观测器可以快速的估计出干扰并补偿。

2.1 TSMDOB 的设计

定义如下观测器来获得公式(2)中的状态变量：

$$\dot{\hat{x}}_2=bu+a\hat{x}_2+\hat{d} \tag{3}$$

式中：$\hat{d}$为 TSMDOB 的输出值，观测误差$\tilde{x}_2=x_2-\hat{x}_2$，$\tilde{d}=d-\hat{d}$。误差变化率有界，即$|\dot{d}|\leqslant L$，$L$ 为正常数。

公式(2)与公式(3)相减，得：

$$\dot{\tilde{x}}_2=a\tilde{x}_2+\tilde{d} \tag{4}$$

定义带积分的终端滑模函数 S_T 为：

$$S_T=\dot{\tilde{x}}_2+\int_0^t(m_1\dot{\tilde{x}}_2-n_1\dot{\tilde{x}}_2^{q_1/p_1})\mathrm{d}t \tag{5}$$

$\hat{d}$设计为：

$$\dot{\hat{d}}=(a+m_1)\dot{\tilde{x}}_2-n_1\dot{\tilde{x}}_2^{q_1/p_1}+\eta(S_T+\mathrm{sgn}(S_T)) \tag{6}$$

式中：m_1、n_1、p_1、q_1、η 为待设计参数；p_1、q_1 为正奇数且满足 $1<q_1/p_1<2$，$m_1>0$，$n_1>0$。TSMDOB 的结构图如图 2 所示，找到合适的参数，来设计控制律，使得切换函数 S_T 快速的收敛到零，从而达到设计的目的。

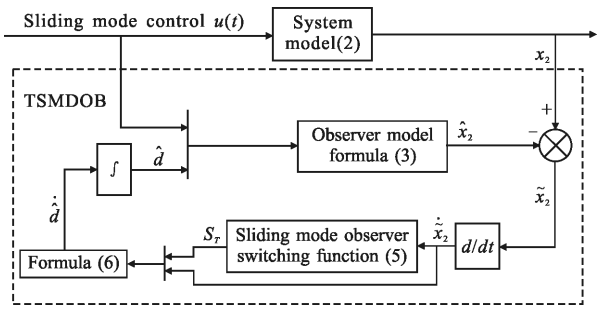

图 2 TSMDOB 结构图

Fig.2 Structure diagram of TSMDOB

引理[15]：假设存在一个定义在原点的领域$\hat{U}\subset U_0\subset R^n$上的光滑函数 $v(x)$，并且存在实数 $c>0$，$0<\alpha<1$，使得 $v(x)$在$\hat{U}$上正定，并且 $v(x)+cv^{\alpha}(x)$在$\hat{U}$上半负定，则系统的原点是有限时间稳定的，停止时间依赖于初始值 $x(0)=x_0$，其上界是 $T_X(x)\leqslant\dfrac{v^{1-\alpha}(x_0)}{c(1-\alpha)}$。

定理：对于公式(2)，选取终端滑模面(5)，设计终端滑模观测器控制律(6)，则可以保证 S_T 在有限时间内趋近至零。

证明：设计 Lyapunov 函数为 $V_T=0.5S_T^2$，则：

$$\dot{V}_T=S_T\dot{S}_T=S_T(\ddot{\tilde{x}}_2+m_1\dot{\tilde{x}}_2-n_1\dot{\tilde{x}}_2^{q_1/p_1}) \tag{7}$$

将公式(4)和(6)代入，得：

$$\dot{V}_T=S_T(L-\eta(S_T+\mathrm{sgn}(S_T)))\leqslant|S_T|(L-\eta)-\eta S_T^2$$

在设计时 $\eta>L$，所以上式$\dot{V}_T\leqslant 0$。令 $\eta-L=\Phi$，$\Phi>0$。则公式(7)可简化为：

$$\dot{V}_T=-|S_T|\Phi-\eta S_T^2$$

式中：$\dot{V}_T+\Phi|S_T|=\dot{V}_T+\Phi\sqrt{2}\,(V_T)^{1/2}=-\eta S_T^2\leqslant 0$，因而由引理可知 S_T 会在有限时间内收敛至零，且 $t_1\leqslant\sqrt{2}\,V_t^{\frac{1}{2}}(S_{T0})/\Phi$。

在实际实现时，用$|\dot{\tilde{x}}_2|^{q_1/p_1}\mathrm{sgn}(\dot{\tilde{x}}_2)$来代替终端滑模面函数 S_T 和$\hat{d}$中的$\dot{\tilde{x}}^{q_1/p_1}$。为了减小抖振采用饱和函数公式(8)来代替符号函数。

$$\mathrm{sat}(s)=\begin{cases}S_T/\varphi_1, & S_T\leqslant\varphi_1\\ \mathrm{sgn}(S_T), & S_T>\varphi_1\end{cases} \tag{8}$$

2.2 TSMC 的设计

根据上述设计的 TSMDOB 可以得到系统的干扰估计值$\hat{d}$。通过控制器的输入端进行干扰补偿，此控制器既保留了传统滑模控制器(Convention Sliding Mode Control，CSMC)的优点，又削弱了滑模控制引起的抖振，加入干扰观测器后系统表达式如下：

$$\dot{x}_2=ax_2+bu_f+\Delta d \tag{9}$$

式中：Δd 为干扰未估计状态，$\Delta d=d-\hat{d}$。假设干扰变化率$|\Delta d|\leqslant l$，l 为正常数。

针对公式(9)，设计如下的控制器。定义系统的跟踪误差为：$z_1=x_1-x_d$，其中 x_d 为指令信号。对 z_1 求导，得：

$$\dot{z}_1=\dot{x}_1-\dot{x}_d=x_2-\dot{x}_d \tag{10}$$

定义第一个 Lyapunov 函数，$V_1=0.5z_1^2$，则对 V_1 求导，得：

$$\dot{V}_1=z_1\dot{z}_1=z_1(x_2-\dot{x}_d) \tag{11}$$

取 $x_2=z_2+\dot{x}_d-c_1z_1$，其中 c_1 为正的常数，z_2 为虚拟控制项，$z_2=x_2-\dot{x}_d+c_1z_1$，则：

$$\dot{z}_1=x_2-\dot{x}_d=z_2-c_1z_1$$

$$\dot{V}_1=z_1\dot{z}_1=z_1z_2-c_1z_1^2 \tag{12}$$

显然，当 $z_2=0$ 时，$\dot{V}_1\leqslant 0$。为此需要进行下一步设计。

定义系统的第二个误差方程为：$z_2=x_2-x_{2d}$，其中 $x_{2d}=-c_1z_1+\dot{x}_d$。对 z_2 求导，得：

$$\dot{z}_2=\dot{x}_2-\dot{x}_{2d}=\dot{x}_2-\ddot{x}_d+c_1z_2-c_1^2z_1 \tag{13}$$

定义终端滑模面：

$$s=z_2+\int_0^t(m_2z_2+n_2z_2^{q_2/p_2})\mathrm{d}t \tag{14}$$

式中：$m_2>0$，$n_2>0$，p_2、q_2 为正奇数，且满足 $1<q_2/p_2<2$。通过设计合适的参数，如果 $s=0$，则 $z_2=0$ 且 $\dot{V}_1\leqslant 0$。

对 s 求导，得：

$$\dot{s}=\dot{z}_2+m_2z_2+n_2z_2^{q_2/p_2}=\dot{x}_2-\ddot{x}_d+(c_1+m_2)z_2-c_1^2z_1+n_2z_2^{q_2/p_2} \tag{15}$$

采用如下形式的幂次趋近律：

$$\dot{s}=-\beta_1|s|^r\mathrm{sgn}(s)-\beta_2s \tag{16}$$

式中：$\beta_1>0$；$\beta_2>0$；$0<r<1$。

由公式(9)、(15)和(16)，得终端滑模控制律 u_f 为：

$$u_f=-\frac{1}{b}(ax_2+\Delta d-\ddot{x}_d+(c_1+m_2)z_2-c_1^2z_1+n_2z_2^{q_2/p_2}+\beta_1|s|^r\mathrm{sgn}(s)+\beta_2s) \tag{17}$$

式中：切换增益 β_1 决定着系统的反应速度，同时决定着抖振的大小。引入自适应控制算法，根据系统中未估计干扰对切换增益进行在线调整，使系统状态收敛至所设计的终端滑模面上。将终端滑模控制律更改为：

$$u_f=-\frac{1}{b}(ax_2+\Delta d-\ddot{x}_d+(c_1+m_2)z_2-c_1^2z_1+n_2z_2^{q_2/p_2}+\Delta\hat{d}|s|^r\mathrm{sgn}(s)+\beta_2s) \tag{18}$$

式中：$\Delta\hat{d}$ 为未估计状态 Δd 的估计值，Δd 的估计误差为 $\Delta\tilde{d}=\Delta d-\Delta\hat{d}$。$k$ 为正的常数，设计自适应律为：

$$\Delta\dot{\hat{d}}=\frac{1}{k}|s| \tag{19}$$

定理：对于公式(9)，终端滑模面选择公式(14)的形式，控制器选择公式(18)的形式时，则可以保证系统的跟踪误差在有限时间内收敛至零。

证明：定义第二个 Lyapunv 函数，$V_2=0.5s^2+0.5k\Delta\tilde{d}^2$，则对 V_2 求导，得：

$$\dot{V}_2=s\dot{s}+k\Delta\tilde{d}\Delta\dot{\tilde{d}}$$

将公式(9)、(18)和 $\Delta\tilde{d}=\Delta d-\Delta\hat{d}$ 代入，得：

$$\begin{aligned}\dot{V}_2&=s(\Delta\tilde{d}-\Delta\hat{d}|s|^r\mathrm{sgn}(s)-\beta_2s)-k\Delta\tilde{d}\Delta\dot{\hat{d}}=\\&s(-\Delta\hat{d}|s|^r\mathrm{sgn}(s)-\beta_2s)+k\Delta\tilde{d}\left(\frac{1}{k}s-\Delta\dot{\hat{d}}\right)\leqslant\\&s(-\Delta\hat{d}|s|^r\mathrm{sgn}(s)-\beta_2s)+k\Delta\tilde{d}\left(\frac{1}{k}|s|-\Delta\dot{\hat{d}}\right)=\\&s(-\Delta\hat{d}|s|^r\mathrm{sgn}(s)-\beta_2s)=-\Delta\hat{d}|s|^{r+1}-\beta_2s^2\end{aligned} \tag{20}$$

由自适应更新律(即公式(19))可知，$\Delta\hat{d}\geqslant 0$。所以 $\dot{V}_2\leqslant 0$。由公式(20)知，$\dot{V}_2+\Delta\hat{d}|s|^{r+1}\leqslant\dot{V}_2+\gamma\sqrt{2}\,V_2^{(r+1)/2}\leqslant-\beta_2s^2\leqslant 0$ 由 2.1 节里的引理可知 V_2 会在有限时间内收敛至零，且系统是稳定的。时间 $t_2\leqslant\dfrac{V_2\frac{1-r}{2}(s_0)}{\gamma\sqrt{2}\left(\frac{1-r}{2}\right)}$。

采用终端滑模面(公式(14))能够使 s 在有限时间内收敛到零，对公式(14)求导得 $\dot{z}_2+m_2z_2+n_2z_2^{q_2/p_2}$，解微分方程即可得 s 收敛到零的时间 $t_3=\dfrac{p_2}{m_2(p_2-q_2)}\times\ln\dfrac{m_2z(t_2)^{(p_2-q_2)/p_2}+n_2}{n_2}$ 在参数选择时保证 $t_1<t_2+t_3$。

但由公式(19)可知自适应项会一直增大，最终会无界，因而在公式(19)的基础上设计一种有界的自适应项(即 $|\Delta\hat{d}|\leqslant\gamma$)如下[16]：

$$\Delta\dot{\hat{d}}=\frac{1}{k}(-\varepsilon\Delta\hat{d}+|s|) \tag{21}$$

此时由于在上述的终端滑模控制律(即公式(18))中有符号函数 $\mathrm{sgn}(s)$ 的存在，会给系统带来抖振问题且容易激发系统的未建模动态，造成系统的不稳定，故采用如下修正的连续化的自适应时变终端滑模控制律。

$$u_f=-\frac{1}{b}(ax_2+\Delta\hat{d}-\ddot{x}_d+(c_1+m_2)z_2-c_1^2z_1+n_2z_2^{q_2/p_2}+\Delta\hat{d}|s|^r\mathrm{sat}(s)+\beta_2s) \tag{22}$$

其中饱和函数为：

$$\mathrm{sat}(s)=\begin{cases}\Delta\hat{d}s/\varphi_2,\ \Delta\hat{d}|s|\leqslant\varphi_2\\ \mathrm{sgn}(s),\ \Delta\hat{d}|s|>\varphi_2\end{cases} \tag{23}$$

3 实验与结果

为了验证文中所提控制方法的有效性，采用视

轴运动控制实验装置，以该装置的某一轴为对象进行实验。测角原件采用的是光电编码器，其数控系统采用研华 IPC610 工控计算机为核心，工控机通过 PCI 总线上 16 位 D/A 转换卡经过光电隔离与 PWM 功率放大器相连来控制电机转动。在基于 Windows-RTX 实时操作系统下通过 VC 编写实验中的控制算法，采样周期为 0.001 s。

利用白噪声扫频的方法获得单自由度的频率特性，通过频率特性拟合，辨识出系统名义模型的参数 J_n=1/800(kg)，B_n=65/800(N·s·m^{-1})。

为了验证文中所提方法的有效性，在实验中将对比三种控制策略：控制策略一，基于 ESO 的 TSMC 控制；控制策略二，基于 TSMDOB 的 CSMC 控制；控制策略三，基于 TSMDOB 的 TSMC 控制。

TSMDOB 的参数为：m_1=73，n_1=260，p_1=5，q_1=3，η=0.5，φ_1=0.002。

TSMC 的参数为：c_1=300，m_1=100，n_2=30，p_2=5，q_2=3，r=0.6，k=0.002，ε=0.001，φ_2=0.05，β_2=100。

CSMC 设计如下：

滑模参考面 $$s_c=ce+\dot{e} \tag{24}$$

传统滑模控制律：

$$u_c=-\frac{1}{b}(ce+ax_2-\ddot{x}_d+\rho\mathrm{sgn}(s)+k_2s) \tag{25}$$

式中：c、ρ、k_2 正常数，c=100，ρ=200，k_2=100。

针对实验装置进行如下两组实验：

(1) 指令信号采用幅值为 0.5°，频率 f 为 0.05 Hz 的正弦信号，位置跟踪曲线如图 3 所示，误差曲线如图 4 所示，控制输入曲线如图 5 所示，控制策略三 TSMC 中的自适应切换增益曲线如图 6 所示。

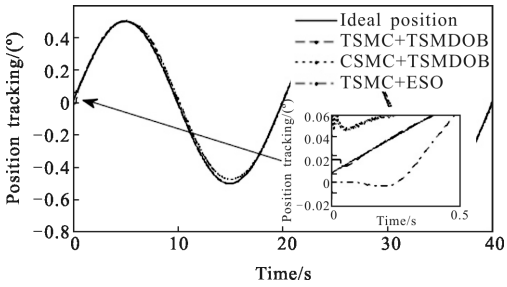

图 3 位置跟踪曲线(f=0.05 Hz)

Fig.3 Curve of position tracking (f=0.05 Hz)

由图 3 可知，三种控制策略均可较好跟踪给定信号，在初始时刻控制策略三可以更快的跟踪给定信号。从图 4 中可以看出控制策略一的最大跟踪误差为 0.005°；控制策略二的最大跟踪误差为 0.037°。控制策略三的最大跟踪误差为 0.002°。控制策略三的跟踪误差最小，有效的提高了系统的跟踪精度和抗干扰性。

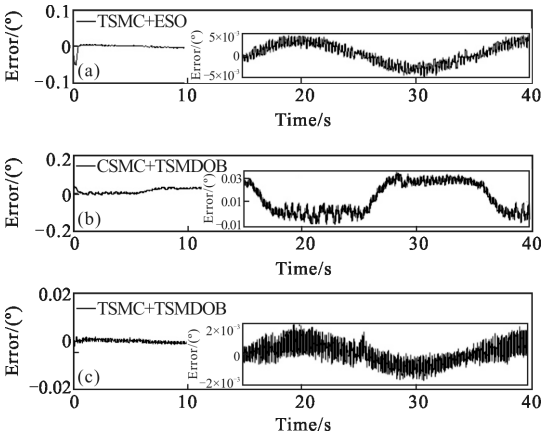

图 4 位置跟踪误差曲线(f=0.05 Hz)

Fig.4 Curve of position tracking error (f=0.05 Hz)

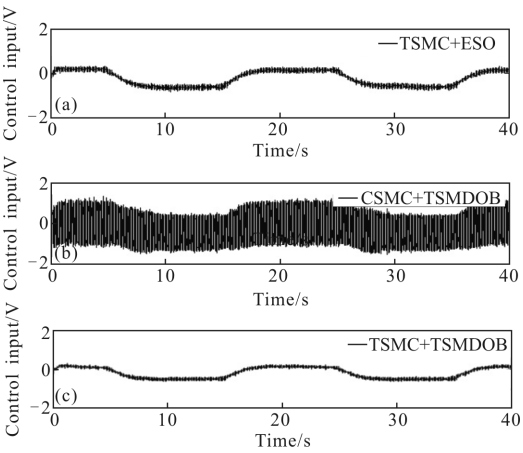

图 5 控制输入曲线(f=0.05 Hz)

Fig.5 Curve of control input (f=0.05 Hz)

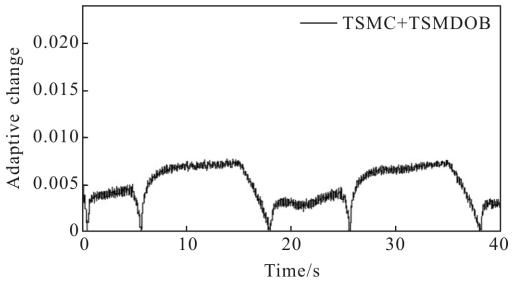

图 6 自适应切换增益曲线(f=0.05 Hz)

Fig.6 Curve of adaptive switch gain (f=0.05 Hz)

由图 5 可知控制策略一和控制策略三可以有效的削弱滑模控制引起的抖振,控制量也得到了一定的减小。

(2) 指令信号采用幅值为 0.5°,频率 f 为 2 Hz 的正弦信号,位置跟踪曲线如图 7 所示,误差曲线如图8 所示, 控制输入曲线如图 9 所示, 控制策略三 TSMC 中的自适应切换增益曲线如图 10 所示。

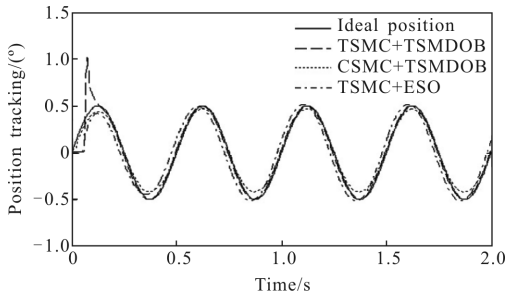

图 7 位置跟踪曲线(f=2 Hz)

Fig.7 Curve of position tracking (f=2 Hz)

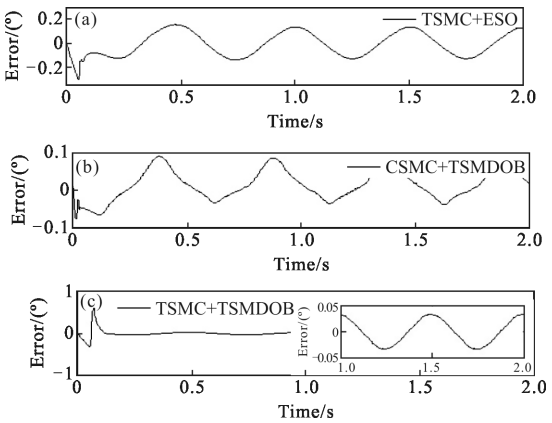

图 8 位置跟踪误差曲线(f=0.05 Hz)

Fig.8 Curve of position tracking error (f=0.05 Hz)

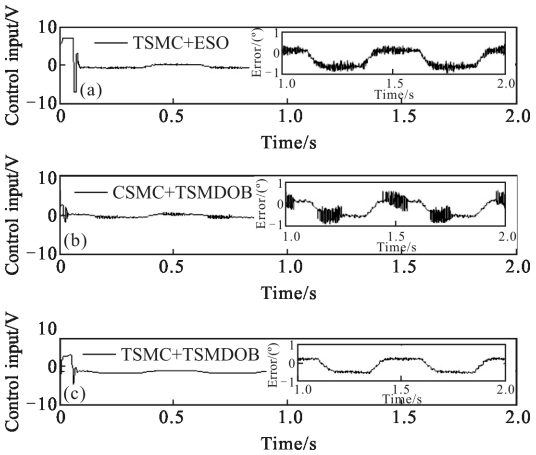

图 9 控制输入曲线(f=2 Hz)

Fig.9 Curve of control input (f=2 Hz)

比较图 7 的跟踪曲线,可以看出在 2 Hz 时控制策略一和控制策略二均不能较好的跟踪给定信号,而控制策略三可以较好的跟踪给定信号。从图 8 中可以得到控制策略一的最大跟踪误差为 0.14°,控制策略二的最大跟踪为 0.088°, 不满足实际系统的要求。控制策略三的最大跟踪误差为 0.034°,满足控制系统的要求。

由图 5 和图 9 可知,控制策略三无论在 0.05 Hz 还是在 2 Hz 均有抖振,但在允许范围内。由图 6 和图 10 的自适应切换增益曲线的变化可知,控制策略三的自适应切换增益是一个有界值, 可见系统是稳定的。

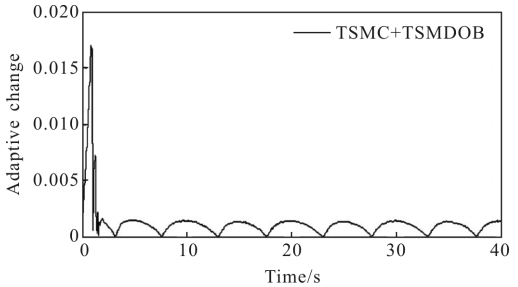

图 10 自适应切换增益曲线(f=2 Hz)

Fig.10 Curve of adaptive switch gain (f=2 Hz)

从上述实验结果中可以看出, 文中所提的控制策略具有较强的鲁棒性, 有效的抑制了干扰对稳定平台的影响,减弱了滑模控制中的抖振,提高了光电稳定平台伺服系统的跟踪精度和抗干扰性。

4 结 论

光电跟踪系统视轴稳定是保证有效跟踪运动目标的首要条件,文中针对稳定平台系统从干扰补偿和跟踪控制角度出发,结合有限时间收敛的思想,设计终端滑模干扰观测器和新型终端滑模控制器。终端滑模干扰观测器对干扰进行快速的估计和有效地补偿;新型终端滑模控制器在保证系统稳定的同时,使系统系统状态在有限时间内得到收敛,滑模控制中的抖振现象也得到了抑制。实验结果表明,文中所提控制策略增强了系统的鲁棒性,提高了系统的跟踪精度。该方法也可应用于其他高精度伺服跟踪系统。

参考文献:

[1] Pan Song. Robust control of gyro stabilized platform driven

by ultrasonic motor[J]. ***Senseors and Actuators A: Physical***, 2017, 261(1): 208-287.

[2] Zou Ying, Lei Xusheng. A compound control method based on the adaptive neural network and sliding mode control for inertial stable platform [J]. ***Neurocomputing***, 2015, 155(5): 286-294.

[3] Zhong Zhiyong, Li Zhiqiang, Zhou Qingkun, et al. Application in prestiction friction compensation for angular velocity loop of inertially stabilized platforms [J]. ***Chinese Journal of Aeronautics***, 2014, 27(3): 655-662.

[4] Gao Xiang, Liu Weiting. Disturbance analysis based on photoelectric stabilized platform [J]. ***Electronic Design Engineering***, 2017, 25(2): 76-79, 84. (in Chinese)
高翔, 刘维亭. 基于光电稳台的扰动分析 [J]. 电子设计工程, 2017, 25(2): 76-79, 84.

[5] Zheng Chunyan, Zhang Honggang, Feng Xingwei, et al. ADRC of airborne electro-optical stabilized platform [J]. ***Electronies Optics & Control***, 2017, 24(2): 51-54. (in Chinese)
郑春艳, 张红刚, 冯兴伟, 等. 机载光电稳定平台自抗扰控制研究[J]. 电光与控制, 2017, 24(2): 51-54.

[6] Zhang Yanshun, Yang Tao, Li Chunyu, et al. Fuzzy-PID control for the position loop of aerial inertially stabilized platform [J]. ***Aerospace Science and Technology***, 2014, 36: 21-26.

[7] Liu Feng, Wang Hua. Fuzzy PID controller for optoelectronic stabilization platform with two-axis and two-frame[J]. ***Optik-International Journal for Light and Electron Optics***, 2017, 140(7): 158-164.

[8] Zhang Huifeng, Wei Xinjiang, Zhang Lingyan, et al. Disturbance rejection for nonlinear systems with mismatched disturbances based on disturbance observer[J]. ***Journal of the Franklin Institute-Eengineering and Applied Mathematics***, 2017, 354(11): 4404-4424. (in Chinese)

[9] Dong Xiaomeng, Wu Yunjie, Song Xiao, et al. Global sliding mode control based on disturbance observer for motor servo system and application to flight simulator[C]//2014 6th IEEE Chinese Guidance, Navigation and Control Conference, 2014: 7007257.

[10] Liu Chengguang, Rudy R Negenborn, Zheng Huarong, et al. A state-compensation extended state observer for model predictive control [J]. ***European Journal of Control***, 2017, 36(1): 1-9.

[11] Chen Fuhong, Ma Dawei, Hu Zhiqi, et al. Rocket launcher system control based on nonsingular terminal sliding mode observer [J]. ***Journal of Gun Launch & Control***, 2014, 35 (3): 21-25. (in Chinese)
陈福红, 马大为, 胡智琦, 等. 基于非奇异终端滑模观测器的火箭炮系统控制 [J]. 火炮系统发射与控制学报, 2014, 35(3): 21-25.

[12] Asl R M, Hagh Y S, Palm R. Robust control by adaptive non-singular terminal sliding mode [J]. ***Engineering Applications of Intelligence***, 2017, 59(3): 205-217.

[13] Shotorbani A M, Babaei E. Robust nonlinear controller based on control Lyapunov function and terminal sliding mode for buck converter [J]. ***International Journal of Numerical Modelling-Electronic Networks Devices and Fields***, 2016, 29(6): 1055-1069.

[14] Khan Q, Akmeliawati R, Bhatti A L, et al. Robust stabilization of underactuated nonlinear systems: A fast terminal sliding mode approach [J]. ***ISA Transactions***, 2016, 66(1): 241-248.

[15] Zhang Yunxi, Sun Mingwei, Chen Zengqiang. Sliding-mode variable structure finite-time convergence guidance law [J]. ***Control Theory & Applications***, 2012, 29 (11): 1413-1418. (in Chinese)
张运喜, 孙明玮, 陈增强. 滑模变结构有限时间收敛制导律[J]. 控制理论与应用, 2012, 29(11): 1413-1418.

[16] Wang Liang, Liu Xiangdong, Sheng Yongzhi. High-order sliding mode observer based adaptive time-varying sliding mode for re-entry attitude control [J]. ***Control and Decision***, 2014, 29(2): 281-286. (in Chinese)
王亮, 刘向东, 盛永智. 基于高阶滑模观测器的自适应时变滑模再入姿态控制[J]. 控制与决策,2014, 29(2): 281-286.